

**EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO EXPLOSIÓN POR
VAPOR EN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE
HARINA DE YUCA Y SUS HIDROLIZADOS**

JESSICA JULIETH SÁNCHEZ MORA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

**EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO EXPLOSIÓN POR
VAPOR EN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE
HARINA DE YUCA Y SUS HIDROLIZADOS**

JESSICA JULIETH SÁNCHEZ MORA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniera Química

Director

Ph.D. LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO*

Codirector

Ph.D. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA*

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

*Profesor Escuela de Ingeniería Química.

Dedicatoria:

A mi papito celestial, porque con sus consejos y apoyo hizo posible de este, su triunfo...

Mi mamita que me regaló esta oportunidad con sus consejos, paciencia y apoyo incondicional.

Autor matemático del conjunto inconmensurable $\mathbb{J}$, que se describe como X , que por relación de equivalencia demuestra que xRy , y en el corolario, a través de un grupo abeliano demuestra que: $X \otimes Y = 1$; dando de esta manera origen a una molécula que por hibridación solo forma enlaces covalentes y que en el primer axioma fundamental de aquella única y original demostración hace parte del conjunto Φ .

Agradecimientos

La autora expresa sus más sinceros agradecimientos a la **Universidad Industrial de Santander** por la formación profesional y personal. A **Colciencias** por creer en la investigación aplicada a la industria, y por la financiación de este proyecto. **Promitec S.A.S.** por permitirme utilizar su laboratorio; a la Dra. Blanca, el ingeniero Erick a Loufrantz y a Marcela por su gran ayuda en los análisis y por su aporte en la investigación.

A todos los que integran el **CICTA** por su acogida y por siempre ofrecernos a los estudiantes UIS el espacio propicio para la experimentación, además del conocimiento que nos imparten. A los técnicos del laboratorio de procesos, especialmente a **Don Eduardo**, por su gran ayuda, sus enseñanzas, y sus consejos que me aportaron mucho en la parte experimental.

Al Dr. **Luis Javier López Giraldo**, por su gran aporte y apoyo en la realización de este trabajo. Al Dr. **Carlos Jesús Muvdi Nova** por su ayuda, consejos y experiencias compartidas que me hicieron aprender, creer en la investigación, y que me aportaron en mi crecimiento profesional y personal.

A Dios por brindarme siempre su amor puro, de guiarme y entregarme todos los elementos que permitieron hacer una realidad este proyecto, donde él me hizo tomar diversos caminos que eran necesarios en el justo momento. A mis **Familiares** por su apoyo incondicional. A mis padres, **Marco Tulio Sánchez, Stella Mora Pinilla** y a mi hermana **Jennifer Paola**, por ser los constructores del deseo de siempre salir adelante sin importar los obstáculos, por afrontar los retos siempre unidos sin importar lo inesperado, por disfrutar la vida con lo justo que se ha ganado y, además, por que son los primeros responsables de lo que hoy soy yo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	13
2. Metodología	17
2.1. Pretratamiento Explosión por Vapor	18
2.2. Secado y Molienda	20
2.3. Tamizado	20
2.4. Hidrólisis Enzimática	20
2.5. Materiales	21
2.6. Métodos Experimentales y de Análisis	21
2.6.1. Análisis Bromatológico Harina de Yuca	21
2.6.2. Determinación Amilosa en Harina	22
2.6.3. Determinación Relación Amilosa y Amilopectina en Harina	22
2.6.4. Viscosidad de Hidrolizados obtenidos a partir de Harina de Yuca	22
2.6.5. Porcentaje de materia no hidrolizada	23
2.6.6. Concentración de Glucosa y Porcentaje de materia seca	23
2.7. Análisis Estadístico	23
3. 3. Resultados, Análisis y Discusión	24
3.1. Pretratamiento Explosión por Vapor	24
3.2. Análisis Bromatológico de Harina de Yuca	24
3.3. Concentración de Amilosa en almidón de yuca, harina de yuca sin y con tratamiento	26
3.4. Relación Amilosa y Amilopectina (Am/Amp) en harina pretratada	28
3.5. Concentración Glucosa	30

3.6. Viscosidad en Hidrolizados de Harina de Yuca Pretratada	31
3.7. Materia No Hidrolizada	33
Conclusiones.	36
Recomendaciones.	37
Bibliografía.	39

Índice de figuras

1.1.	Moléculas de Disacáridos y rompimiento de enlace en hidrólisis de almidón. Fuente Ruiz, 2009 .	14
2.1.	Cuadro Metodológico. Fuente Autora .	17
2.2.	Diagrama de flujo de la metodología empleada en este trabajo de investigación. Fuente Autora .	18
2.3.	Esquema montaje experimental del Equipo de explosión por vapor. Fuente Autora .	19
3.1.	Concentración de amilosa (<i>mg/l</i>) para los tres niveles seleccionados del factor Ciclos en el diseño de experimentos 3^k factorial completo en harina de yuca sin tratamiento y pretratada a 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> y 70 <i>psi</i> .	27
3.2.	Concentración de amilosa (<i>mg/l</i>) para los tres niveles de los factores seleccionados (<i>P</i> : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; <i>N</i> .Ciclos: 1, 2, 3) comparados con la concentración de amilosa en almidón de yuca y harina de yuca sin tratamiento.	27
3.3.	Relación en base seca <i>p/p</i> de amilosa y amilopectina para harinas pretratadas y sin tratamiento, para todos los niveles del factor ciclos. (<i>P</i> : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i>).	29
3.4.	Concentración Glucosa (<i>mg/l</i>) en los hidrolizados de harinas tratadas para los tres niveles seleccionados del factor Ciclos (<i>N</i> . Ciclos: 1, 2, 3), en el diseño de experimentos 3^k factorial completo. (Presión: 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i>).	31
3.5.	Viscosidad (<i>cP</i>) en hidrolizados de harina de yuca sin tratamiento (<i>P</i> = 14, 7 <i>psi</i> ; <i>N</i> .Ciclo: 0) y pretratada en función de los niveles de presión seleccionados para el diseño de experimentos 3^k factorial completo. (<i>N</i> .Ciclos: 1, 2, 3).	33
3.6.	Diagrama de dispersión Concentración Glucosa y Viscosidad (<i>%cP</i>) para los tres niveles de los factores seleccionados (<i>P</i> : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; <i>N</i> .Ciclo: 1, 2, 3) en el diseño de experimentos 3^k factorial completo.	33

3.7.	Porcentaje de Materia no Hidrolizada en hidrolizados de harina de yuca pretratada para el diseño de experimentos 3^k factorial completo en los tres niveles del factor Número de Ciclos (P : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i>).	35
3.8.	Diagrama de Dispersión Concentración de Glucosa y Materia no Hidrolizada (% <i>BS</i>) para los tres niveles de los factores seleccionados (P : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; N.Ciclos: 1, 2, 3) en el diseño de experimentos 3^k factorial completo.	35
3.9.	Curva de Calibración Concentración Amilosa en Harina de Yuca.	38

Índice de Tablas

2.1. Factores y niveles considerados en el diseño factorial 3^k completo con una réplica. Fuente Autora .	19
3.1. Composición química de Harina de Yuca sin tratamiento y con tratamiento explosión por vapor. Fuente: Autora .	25
3.2. Concentración de amilosa en almidón de yuca, harina de yuca sin y con tratamiento para las 9 muestras del diseño factorial Completo 3^k (P : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; N.Ciclos: 1, 2, 3)	26
3.3. Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la concentración de amilosa en harinas pretratadas.	28
3.4. Porcentaje amilosa y amilopectina en base seca y su reacción para harina de yuca sin y con tratamiento (P : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; N.Ciclos: 1, 2, 3)	29
3.5. Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la relación Am/Amp (BS) en harina de yuca pretratada.	29
3.6. Concentración Glucosa en Hidrolizados Harina de Yuca con y sin Tratamiento para los 9 tratamientos y sus duplicados del diseño factorial completo 3^k . (P : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; N.Ciclos: 1, 2, 3).	30
3.7. Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la concentración de glucosa en hidrolizados de harinas pretratadas.	31
3.8. Viscosidad de Hidrolizados de Harina de Yuca y los 9 tratamientos con sus duplicados (P : 40 <i>psi</i> , 55 <i>psi</i> , 70 <i>psi</i> ; N.Ciclos: 1, 2, 3).	32
3.9. Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la viscosidad en hidrolizados de harinas pretratadas.	33
3.10. Porcentaje de Materia no Hidrolizada en Hidrolizados de Harina pretratada.	34
3.11. Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para el porcentaje de materia no hidrolizada de harinas pretratadas.	35

3.12. Ecuación de la Curva de Calibración Amilosa. Fuente: Autora	38
---	----

RESUMEN

Título: EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO EXPLOSIÓN POR VAPOR EN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE HARINA DE YUCA Y SUS HIDROLIZADOS **

Autor: JESSICA JULIETH SÁNCHEZ MORA***

Palabras claves: Yuca, amilosa, glucosa, viscosidad, reacción de Maillard.

Descripción:

El almidón de yuca es usado como materia prima de jarabes de glucosa ampliamente demandados por la industria alimentaria, farmacéutica y de biocombustibles. La harina de yuca es poco usada debido a sus impurezas, causando cambios desfavorables en las propiedades fisicoquímicas de jarabes de glucosa de baja conversión. Se evaluó el efecto del pretratamiento explosión por vapor como estrategia para mejorar las propiedades fisicoquímicas de harina de yuca y sus hidrolizados. Se trabajó con harina grado alimenticio (bajo contenido de fibra). Los factores seleccionados fueron la presión y el número de ciclos; las variables de respuestas fueron, composición química de harina (humedad, cenizas, proteína, fibra, grasa, almidón), contenido de amilosa y amilopectina en harina y su relación, concentración de glucosa, el porcentaje de materia no hidrolizada y la viscosidad en hidrolizados. Los datos fueron analizados con el paquete estadístico Statgraphics® Centurion XVI versión prueba. Se evidenció la reacción de Maillard en la harina de yuca tratada en todos los niveles de los factores estudiados. Los resultados obtenidos mostraron que el pretratamiento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre todas las variables de respuesta. En términos de los niveles escogidos para cada uno de los factores estudiados (Presión, Número de ciclos) las condiciones más favorables son 40 *psi* y 1 *ciclo*. Bajo estas condiciones se obtienen hidrolizados con menor viscosidad y menor cantidad de materia no hidrolizada, evitando problemas en la etapa de clarificación.

** Trabajo de grado.

Ph.D. LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO, Director.

Ph.D. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA, Codirector.

*** Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander.

ABSTRACT

Title: EVALUATION OF STEAM EXPLOSION PRETREATMENT ON PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CASSAVA FLOUR AND HYDROLYSATES.**

Author: JESSICA JULIETH SÁNCHEZ MORA***

Keywords: Cassava, amylose, glucose, viscosity, Maillard reaction..

Description:

Cassava starch is used as raw material glucose syrups widely demanded by the food, pharmaceutical and biofuel industry. Cassava flour is rarely used due to its impurities, causing adverse changes in the physicochemical properties of low converted syrups. Evaluated the effect of steam explosion pretreatment as a strategy to improve the physicochemical properties of cassava flour and hydrolysates. Cassava flour used was food grade (low fiber). Pressure and number of cycles were selected factors; response variables were chemical composition of flour (moisture, ash, protein, fiber, fat, starch), amylose and amylopectin and their relation, glucose concentration, percentage of non-hydrolyzed material and viscosity in hydrolysates. The data was analyzed using Statgraphics® Centurion *XVI* statistical package, trial version. It showed the Maillard reaction in treated cassava flour at all levels of the factors studied. The results showed that the pretreatment has a statistically significant effect on all response variables, compared to flour without this pretreatment. In terms of level chosen for each of the factors selected (Pressure, and number of cycles) the most favorable conditions were 40 *psi* and 1 *cycle*. Under these conditions are obtained with lower viscosity and non-hydrolyzed material hydrolyzed, avoiding problems clarification.

** Graduation project.

Ph.D. LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO, Undergraduate Dissertation Director.

Ph.D. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA, Undergraduate Dissertation Codirector.

*** Chemical Engineering, Chemical Engineering Department, Physicochemical Engineering's Faculty, Universidad Industrial de Santander.

Capítulo 1

Introducción

La glucosa ($C_6H_{12}O_6$), es el monosacárido de reserva de carbohidratos más abundante en semillas, raíces, frutas así como en hidrolizados de almidón proveniente de tubérculos (Rolland *et al.*, 2012). Debido a las propiedades fisicoquímicas de estos, le confiere características preservantes, aumento del sabor, estabilizador de espuma, acción aglutinante, emulsificante, brillo y apariencia especialmente a bebidas ligeras y comestibles (González *et al.*, 2002). La industria alimentaria, farmacéutica y recientemente los biocombustibles son los mayores demandantes de hidrolizados de glucosa (Castaño *et al.*, 2011).

Los hidrolizados son obtenidos por medio de la hidrólisis de almidón de diferentes fuentes, como por ejemplo la yuca, siguiendo uno de los diversos tipos de catálisis: ácida, enzimática, ácida-enzimática (Morales, Sánchez, 2004; Anaya, 2004). Generalmente, el término empleado para medir el grado de conversión de almidón, y más específicamente de amilosa en *D* – glucosa es “equivalente de dextrosa” (*ED*), que está definido como: el porcentaje en peso de glucosídicos reductores presentes en el jarabe con respecto al peso de los sólidos totales de oligosacáridos (Carrascal, 2005; Becerra, 2011). Como indica la siguiente ecuación:

$$ED = \frac{W_{gr}}{W_{st}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Donde, W_{gr} es el peso de glucósidos reductores presentes en el jarabe, W_{st} es el peso seco de los sólidos totales presentes en el jarabe.

La clasificación de los hidrolizados o glucosas líquidas obtenidas en la hidrólisis enzimática parcial o total del almidón está dada como: dextrinas (*ED* menor a 20) (Anaya, 2004), jarabes

de glucosa de baja conversión (*ED* 28 – 37), de conversión media o estándar (*ED* 42), y de alta conversión (*ED* 55 o superior) (Vidal, 2010).

La hidrólisis es una reacción química-orgánica donde ocurre una descomposición de la estructura orgánica del compuesto por efecto del agua como lo muestra la Figura 1.1. En hidrólisis enzimática, no se producen reacciones laterales, no hay formación de producto de degradación de la glucosa (hidroximetilfurfural, ácido levulínico y ácido fórmico), además se evita la degradación de los equipos porque las condiciones de reacción son suaves comparadas con las de la hidrólisis ácida (Anaya, 2004; Morales, Sanchez, 2004). El proceso requiere de tres etapas características:

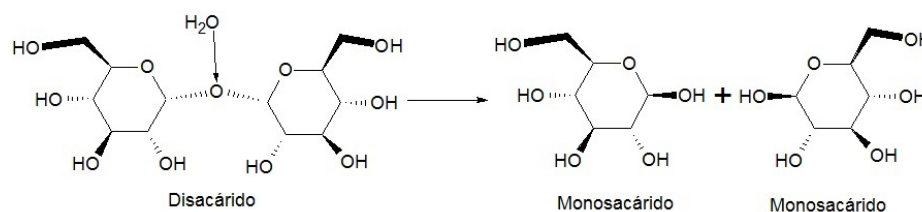


Figura 1.1: Moléculas de Disacáridos y rompimiento de enlace en hidrólisis de almidón. Fuente Ruiz, 2009.

- Gelatinización, añadiendo calor se forma una suspensión acuosa en condiciones de temperatura de 70°C . En un tiempo pequeño hay ruptura de gránulos de almidón, formando un gel (formación de red de agua tridimensional).
- Licuefacción, implica la formación de dextrinas (*ED* más o menos 10) por acción de la enzima α -amilasa, es una hidrólisis parcial del almidón que se hace de forma no selectiva.
- Sacarificación, formación de D-glucosa por sacarificación de dextrinas mediante glucoamilasa (*ED* mayor a 20), que hidroliza los enlaces glucosídicos $\alpha-1,4$ y $\alpha-1,6$ de la amilosa y la amilopectina separando unidades de glucosa a partir del extremo no reductor de la cadena (Mera, Carrera, 2005).

Actualmente, Promitec S.A.S. es una empresa santandereana consolidada, que produce jarabes de glucosa a partir de la hidrólisis enzimática de almidón de yuca. En los últimos años Promitec ha identificado que en Colombia hay insuficiencia de oferta de almidón de yuca, debido a que son pocas las empresas colombianas que lo producen, a esto se suman los fenómenos naturales que han causado una disminución en la productividad. En estas situaciones, las empresas

de producción de almidón buscan suplir a industrias que demanden mayor cantidad de este producto como la industria panadera. Por tanto Promitec S.A.S. como otras empresas del país se han visto obligadas a importar su materia prima, lo que conlleva a un aumento considerable en los costos. Por esto, el objetivo de esta empresa es buscar una alternativa viable que les permita cambiar de materia prima evitando grandes modificaciones en el proceso de producción de jarabes de glucosa; teniendo en cuenta que los precios por kg de almidón y de harina, se encuentran alrededor de \$3217 y \$515 (valor corregido según inflación) respectivamente ([Industrias del Maíz S.A., 2012](#); [Betancourth, 2003](#); [INCP, 2013](#)). Este cambio de materia prima, aunque no produce una modificación significativa en el grado de hidrólisis, sí modifica las características fisicoquímicas como, viscosidad y porcentaje de materia no hidrolizada (mucílago), que repercuten en el sistema de filtros, taponándolos e impidiendo la clarificación de su producto.

Sin embargo, en los últimos años se ha evidenciado que la susceptibilidad del almidón de yuca al ataque enzimático es influenciado por diversos factores tales como: el tamaño y forma de los gránulos que componen el almidón, la relación amilosa/amilopectina ([Mera *et al.*, 2003](#)) el peso molecular promedio de esta relación amilosa/amilopectina, la presencia de inhibidores enzimáticos como: impurezas, fibra, proteínas, ácido cianogénico, ceniza, humedad ([Aryee *et al.*, 2005](#)), y la cristalinidad de las moléculas de almidón ([Shariffa *et al.*, 2009](#)).

Diferentes pre-tratamientos físicos o químicos son comúnmente empleados antes de llevar a cabo el proceso de hidrólisis, con el objetivo de modificar la cristalinidad de las moléculas, disminuir el tamaño de gránulo o disminuir las sustancias que inhiben la hidrólisis. Entre estos se pueden mencionar el uso de humedad, calor, corte o la radiación ([Zavareze *et al.*, 2010](#)). Este trabajo planteó el uso de la explosión por vapor (auto hidrólisis), que es un tratamiento físico (desagregación o ruptura de las fibras) - químico (despolimerización y rotura de enlaces), ([Oliva, 2003](#); [Sun, Cheng, 2002](#)). Es un método de pre tratamiento de biomasa, que aún no se ha experimentado con sustratos ricos en almidón, pero que debido a sus ventajas, y teniendo en cuenta que estudios recientes revelan que operando a menor temperatura y tiempo de residencia los resultados son más favorables ([Sun, Cheng, 2002](#)), nace la idea de implementarlo como un tratamiento previo a la hidrólisis enzimática de harina de yuca. La finalidad es evaluar el contenido de amilosa, amilopectina y su relación en peso en la harina de yuca y las características fisicoquímicas de sus hidrolizados; y de esta manera aumentar la cantidad de

materia susceptible a ser hidrolizada, gracias a la auto hidrólisis del almidón y la desagregación de la región amorfa (amilopectina); sin dejar de lado los deseos de buscar la aplicabilidad industrial, explorando niveles de temperatura y tiempo de residencia menores, a los trabajados con materiales lignocelulósicos.

El pretratamiento consiste en causar un cambio de presión en un periodo de tiempo corto, por medio de la inyección de vapor saturado a la harina de yuca. Es decir, causar un cambio de presión rápido y con esto la desagregación de las cadenas de amilosa y amipectina debido a la alta temperatura y por lo tanto aumentar el potencial de la hidrólisis de almidón, por medio de la inyección de vapor saturado. Los factores que afectan el pretratamiento son: la temperatura, el tiempo de residencia, el tamaño de la partícula (se encuentra entre 15–30 *mm.*) (Ballesteros, 2001) y la humedad (Yu *et al.*, 2012; Sung, Cheng, 2002). En materiales lignocelulósicos se trabaja con temperaturas entre 160 °C y 260 °C, que corresponde a presiones de 0,69 MPa a 4,8 MPa (100,076 *psi* a 696,18 *psi*) para tiempos cortos (1 *min.* a 10 *min.*) (Oliva, 2003).

El presente trabajo de investigación hace parte del Proyecto titulado: “Aumento de la productividad de concentrados de jarabes de glucosa obtenidos a partir de hidrolizados de almidón de yuca por métodos no convencionales” con código 1102 – 5022 – 7720, Colciencias-UIS-Promitec S.A.S. Uno de los objetivos que quiere alcanzar la empresa Promitec S.A.S es buscar alternativas viables para pretratar la harina de yuca utilizada en el proceso de elaboración de jarabes de glucosa.

Capítulo 2

Metodología

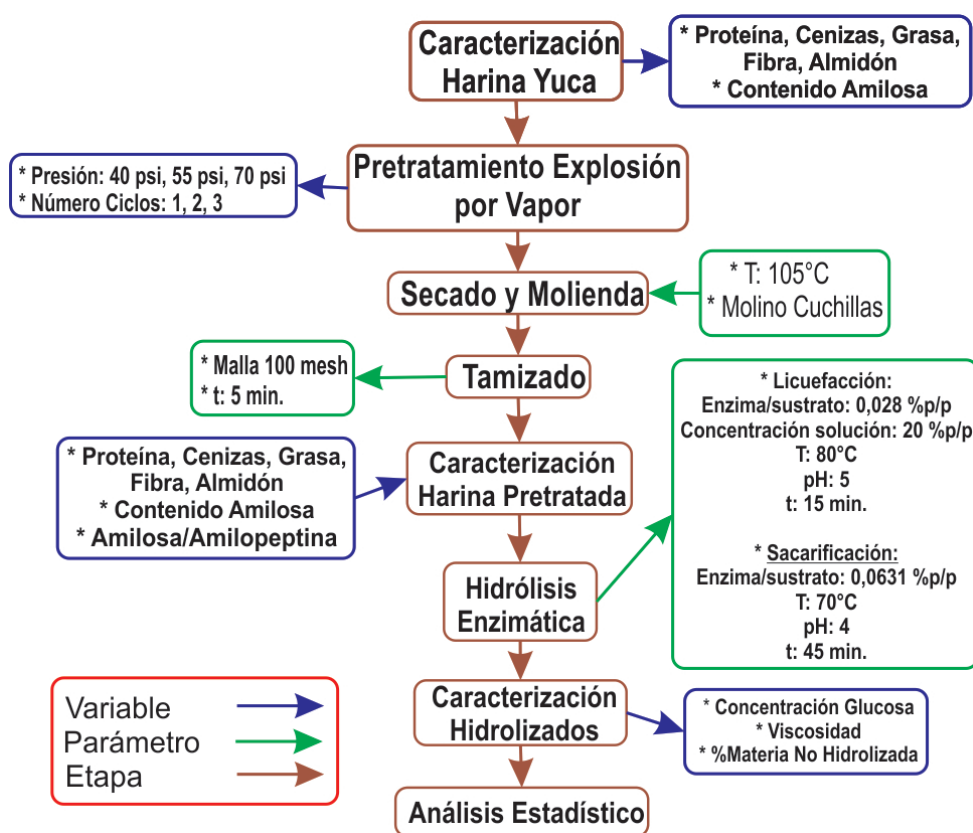


Figura 2.1: Cuadro Metodológico. Fuente [Autora](#).

Como lo muestra el cuadro metodológico (Figura 2.1), se llevaron a cabo ocho etapas. El diagrama del piloto empleado para este trabajo de investigación se puede observar en la Figura 2.2. Para la etapa 2, se adaptó un equipo de acero galvanizado, usado para el

paso de vapor saturado de alta presión, (ubicado en el laboratorio de procesos de la escuela de ingeniería química) para utilizar la técnica de explosión por vapor como se observa en la Figura 2.3. El montaje experimental para la etapa de hidrólisis enzimática se llevó a cabo en modo Batch y a escala laboratorio.

Realizado el pretratamiento se obtuvieron dos productos, harina-húmeda y vapor de agua (condensado); el producto sólido se llevó a proceso de secado para su posterior molienda, caracterización y evaluación a través de las pruebas de hidrólisis enzimática; por otro lado el vapor de agua (condensado) que estuvo en contacto con la harina pretratada (*HYP*) se lleva a analizar para determinar concentración de azúcares reductores formados después del proceso de auto hidrólisis.

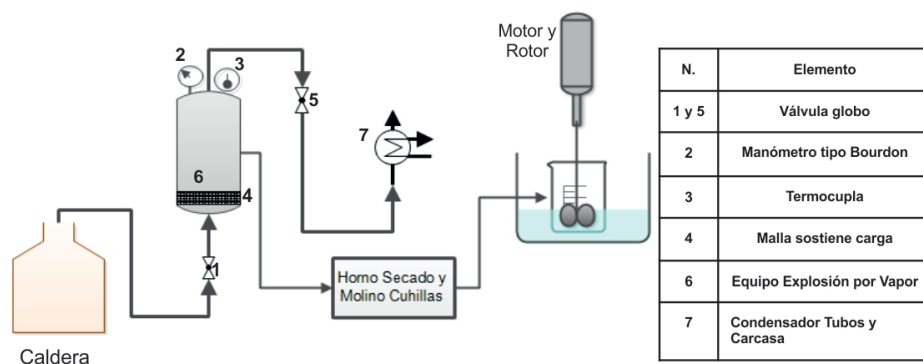


Figura 2.2: Diagrama de flujo de la metodología empleada en este trabajo de investigación. Fuente [Autora](#).

2.1. Pretratamiento Explosión por Vapor

Se evaluó la influencia que tiene el pretratamiento de explosión por vapor en la concentración de glucosa y las características fisicoquímicas de la harina estudiada y sus hidrolizados. El equipo de explosión se cargó con 500 g de harina de yuca.//

Los niveles de trabajo seleccionados están por debajo del intervalo implementado para biomasa, primero, porque las fuerzas de enlace glucosídicas son menores a las fuerzas de enlace de las cadenas de celulosa, hemicelulosa y lignina, y segundo, los estudios indican que los resultados son más favorables operando por debajo del área experimental establecida para biomasa ([Sung, Cheng, 2002](#)). Se desarrolló un diseño factorial completo 3^k . En la Tabla 2.1 se encuentran los factores y los niveles considerados en este trabajo de investigación. El tiempo de residencia (5

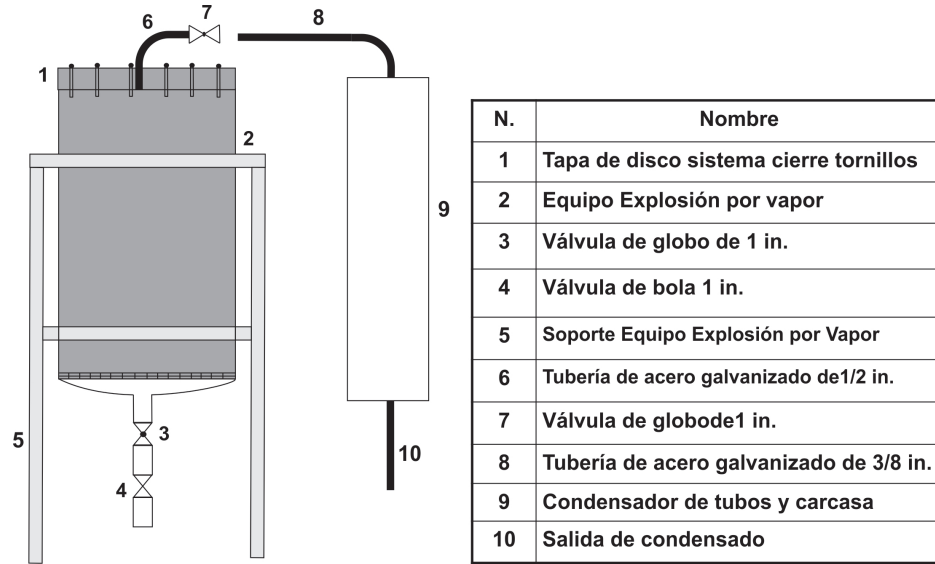


Figura 2.3: Esquema montaje experimental del Equipo de explosión por vapor. Fuente [Autora](#).

min), el tamaño de partícula de la harina ($200 \mu m - 150 \mu m$), y la humedad de la harina (10,95%), son parámetros. Cada ciclo se consideró como el tiempo de exposición de la harina de yuca al vapor de agua saturado, sin tener en cuenta el intervalo de tiempo entre el final de un ciclo y el inicio del siguiente. El tiempo entre ciclos estuvo entre 2 min y 5 min . Después de cada ciclo, el vapor de agua condensado se recolectaba para su posterior análisis (determinación de azúcares reductores como equivalentes glucosa)

Factores	Niveles
P: Presión	<i>P1: 40 psi</i>
	<i>P2: 55 psi</i>
	<i>P3: 40 psi</i>
C: Ciclos	<i>C1: 1</i>
	<i>C2: 2</i>
	<i>C3: 3</i>

Tabla 2.1: Factores y niveles considerados en el diseño factorial 3^k completo con una réplica. Fuente [Autora](#).

El piloto de explosión por vapor, es alimentado con vapor proveniente de una caldera pirotubular de dos pasos cuyo combustible es gas natural, de 30 *BHP* y opera a 100 *psi*; el flujo de vapor, estuvo en el intervalo de 0,003 *l/s* a 0,007 *l/s*. El equipo de explosión por vapor de fondo cónico,

con capacidad de 10 l, era sellado por una tapa de disco con sistema de cierre de tornillos. En la parte inferior del equipo se ubicó la entrada de vapor, en la parte superior estaba la salida de vapor y conectadas a través de una tubería de 3/8 in al condensador de tubos y carcasa de acero inoxidable, como lo muestra la Figura 2.3. El flujo de vapor saturado se controló con válvulas de globo de 1 in. El vapor de agua condensado que quedaba dentro del equipo se recuperaba a través de una válvula de bola de 1 in. La harina de yuca se cargaba al reactor en una bolsa de lona con el fin de evitar escape de materia prima por tuberías.

2.2. Secado y Molienda

La harina después del tratamiento se llevó a secado según Norma A.O.A.C., 925,10 Ed. 18: 2005. La molienda (tipo batch) se llevó a cabo en un molino de cuchillas, por un tiempo de 5 min. Estas operaciones unitarias se realizaron con el fin de homogenizar la muestra de harina pretratada.

2.3. Tamizado

Con el fin de normalizar el tamaño de la muestra, la harina pretratada se hizo pasar por un tamiz de la serie de Tyler de 100 mesh (150 μm).

2.4. Hidrólisis Enzimática

La etapa de hidrólisis se realizó en discontinuo, con 100 ml de solución harina de *yuca/agua* (20 % *p/v*), agitación constante a 50 rpm. El pH se ajustó con solución de HCl 2N y NaOH 2N; pasado el tiempo de reacción para cada etapa, se ajustó el pH a 2,0 por 1 h. Los parámetros de operación empleados fueron los reportados por Acevedo, Parra (2013):

- Licuefacción: temperatura: 80°C, pH: 5, tiempo de reacción: 15 min,. Temperatura de carga de harina lista para ser hidrolizada: 60°C, relación *enzima/sustrato* 0,028 %*p/p*.
- Sacarificación: temperatura: 70°C, pH: 4,5, tiempo de reacción: 45 min, relación *enzima/sustrato*: 0,063 %*p/p*.

Para análisis fisicoquímicos se tomaron 15 ml de hidrolizado, y así determinar, las características fisicoquímicas, definido por análisis fisicoquímico en hidrolizados como viscosidad, % materia no hidrolizada y concentración de glucosa.//

2.5. Materiales

- Harina de yuca, suministrada por Promitec S.A.S. Caldera Piro-tubular de 2 pasos, 30 BHP a gas, marca COLMÁQUINAS. Válvulas de globo de 1 in. Manómetro tipo Bourdon. Equipo Explosión por vapor de acero inoxidable. Condensador de tubos y carcasa de acero inoxidable. Termocupla y termopozo, utilizada para medir la temperatura en el reactor explosión por vapor. Bolsas de Dril *Super* – 8 con sellado graduable, de medidas diámetro base: 25 cm, altura: 20 cm suministrada por Promitec S.A.S. Enzimas α – amilasa (Lyquozyme SC DS®) y glucoamilasa (Spirizyme Fuel®), marca Novozymes. Espectrofotómetro Genesys 20, marca ThermoSpectronic. Viscosímetro BROKFIELD MOD.DVIII + Rheometer, una aguja SC418. pH-metro, marca Hanna® HI 991001. Baño Termos-tatado, marca WWR Scientific Products. Tamiz estándar tamaño 100 mesh (150 μ m), marca Tyler. Amylose from potato, marca Sigma-Aldrich®, etanol 99,9 % y ácido acético marca Sigma-Aldrich®, Yoduro de Potasio, *Iodo*. NaOH en lentejas, HCl al 37 % marca Merck®. Balanza analítica OHAUS.

2.6. Métodos Experimentales y de Análisis

2.6.1. Análisis Bromatológico Harina de Yuca

La harina de yuca antes y después del pretratamiento se analizaron en el CICTA, por los métodos: A.O.A.C., 925,10: 2005 (Sólidos (totales) y pérdida por secado (humedad) en la harina); A.O.A.C., 923,03: 2005 (Determinación de cenizas en Harinas); A.O.A.C., 930,20: 2005 (Fibra Cruda); A.O.A.C., 920,87: 2005 (Determinación de proteína en la harina); A.O.A.C., 920,8: 2005 (Grasa (cruda) o extracto etéreo en la harina). Las muestras se rotularon con las siglas HY (Harina de Yuca sin Tratamiento) y HYP (Harina de Yuca Pretratada), seguido del nivel del factor presión y el nivel del factor Número ciclos del pretratamiento.//

El contenido de carbohidratos en las muestras de harina, se determinó por diferencia a partir de los resultados obtenidos en la determinación de grasa, ceniza, proteína y humedad. Todos

los resultados están reportados en base seca.

2.6.2. Determinación Amilosa en Harina

Se realizó el análisis de determinación de amilosa, a *HY* y las 9 *HYP* con sus duplicados, siguiendo el método colorimétrico estándar ISO 6647 (Pérez *et al.*, 2011). La harina fue dispersada con etanol al 95 % y gelatinizada con *NaOH* en baño de agua en ebullición durante 10 *min*. Se tomó 0,5 *ml* de alícuota, que fue acidificada con ácido acético 1*N* y tratada con una solución de yodo al 2 %, tomando un color azul-negro (la intensidad del color está relacionada con el contenido de amilosa en la muestra), después de 20 minutos (protegido de la luz) se midió la absorbancia a 650 *nm*, y se compara con la curva estándar de amilosa. La curva de calibración se realizó usando amilosa extraída de papa. Cada análisis se realizó por triplicado.

2.6.3. Determinación Relación Amilosa y Amilopectina en Harina

Se estudió el efecto del pretratamiento sobre la relación del porcentaje de amilosa (*Am*) y el porcentaje de amilopectina (*Amp*) en harina de yuca y los 9 tratamientos del diseño de experimentos con sus duplicados. A través del análisis bromatológico se determinó el porcentaje de almidón (*A*) en harina y una vez conocido el porcentaje de amilosa en harina de yuca (sin y con tratamiento) por diferencia se puede conocer el porcentaje de amilopectina en la muestra analizada, como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$Amp = A(\%BS) - Am(\%BS) \quad (2.1)$$

2.6.4. Viscosidad de Hidrolizados obtenidos a partir de Harina de Yuca

Después de la hidrólisis se realizaron y desactivada la enzima (pH de 2.0-2,5, por 1 h.), se realizaron las mediciones a 25°C. Este parámetro fue medido con el fin de determinar el efecto del pretratamiento sobre el comportamiento reológico de los hidrolizados. Las mediciones se realizaron a la harina de yuca y los 9 tratamientos del diseño de experimentos con sus duplicados.

2.6.5. Porcentaje de materia no hidrolizada

Se realizó por diferencia de peso de la materia insoluble (no hidrolizada y retenida en un papel filtro) sobre el total de harina utilizada; esta materia es llamada mucílago, la cual es determinante en el método para clarificar los hidrolizados. Se evaluó la influencia que tiene el pretratamiento sobre el contenido no hidrolizable (almidón retrogradado e impurezas) presentes en hidrolizados a partir de harina de yuca sin y con tratamiento. Las mediciones fueron realizadas a la harina de yuca y los 9 tratamientos del diseño de experimentos con sus duplicados.

2.6.6. Concentración de Glucosa y Porcentaje de materia seca

Medidas que determinan la calidad del hidrolizado, empleando el método kit de glucosa y la Norma A.O.A.C., 1980 (materia seca) según manual de procedimientos para caracterización fisicoquímica para producto terminado de Promitec S.A.S. Las 9 muestras y sus duplicados se centrifugaron a 4500 rpm durante 30 min y se filtraron con un papel filtro tipo analítico.//

2.7. Análisis Estadístico

Se emplearon las pruebas t – *student* y análisis de varianza, para el análisis de los datos a través del software Statgraphics® Centurion XVI versión de prueba. Los supuestos de normalidad se comprobaron a través de la prueba *Shapiro – Wilk* y por prueba de bondad de ajuste de *Kolmoorov – Smirnov*. El nivel de significancia fue del 95 %. Se empleó el coeficiente de correlación de Pearson (r) para determinar la relación entre las variables de respuesta, $r \simeq 1$, variables fuertemente correlacionadas).

Capítulo 3

3. Resultados, Análisis y Discusión

3.1. Pretratamiento Explosión por Vapor

La harina de yuca, mostró un cambio físico y químico evidenciado por la formación de una costra de color marrón y olor dulce, entendido como reacción de Maillard (*RM*) o pardeamiento no enzimático que se presenta en alimentos y depende del *pH*, temperatura, actividad acuosa y el tipo de sustrato. El producto de esta reacción es un complejo amino libre-azúcar reductor (como glucosa-maltosa) (Rufián *et al.*, 2009); se infiere que ocurrió una hidrólisis puesto que el almidón contenido en harina de yuca no reacciona con las proteínas.

3.2. Análisis Bromatológico de Harina de Yuca

Los resultados de la caracterización de *HY* y *HYP* se muestran en la Tabla 3.1. De acuerdo al contenido de humedad obtenido para *HY* 10,95%, se puede decir que es un producto de buena calidad y con un tiempo de vida útil favorable(humedades mayores a 12% permiten el crecimiento microbial y por consiguiente corto tiempo de vida útil) (Aryee, Oduro, Ellis, 2005).

El contenido de almidón en harina de yuca sin y con tratamiento son mayores a los reportados por Aryee *et al.* (2005) (67,92 % a 88,11 %) y Charoenkul *et al.* (2011) (79,62 % a 85,99 %), pero el contenido de cenizas en harina de yuca sin tratamiento (0,955 %) es bajo comparado con los obtenidos por estos dos autores: Aryee *et al.* (2005) (1,00 % a 2,84 %) y Charoenkul *et al.* (2011) (1,50 % a 2,34 %). De acuerdo a estos resultados se infiere que el tipo

de harina de yuca estudiada tiene un grado de pureza mayor a las trabajadas en investigaciones.

Al analizar la variación en el porcentaje de proteína y almidón (estructuras implicadas en la reacción de Maillard), se encuentra que el aumento en almidón para una harina tratada es del 0,230 % comparada con una harina sin tratamiento; en el caso de proteínas para harina de yuca sin tratamiento no hay un aumento significativo ($p - valor > 0,05$) con respecto a la harina tratada. El método empleado para determinar proteínas en harina de yuca pretratada no fue el adecuado puesto que este no es sensible a esta modificación química. En cuanto al contenido de cenizas que fue significativo ($p - valor < 0,05$) se reporta un decremento del 15,757 %. Se realizó el análisis de humedad necesario para determinar la composición química de harina de yuca tratada (cenizas, proteína, fibra, grasa).

Muestra	Humedad	Cenizas (%)	Proteína (%)	Almidón (%)
HY*	10,950 ± 0,005	0,955 ± 0,003	1,101 ± 0,000	97,945
** HYP 40 - 1	10,577 ± 0,005	0,742 ± 0,020	1,150 ± 0,002	98,108
	9,868 ± 0,004	0,722 ± 0,020	0,172 ± 0,020	99,106
** HYP 40 - 2	10,207 ± 0,009	0,826 ± 0,010	1,042 ± 0,006	98,132
	10,224 ± 0,010	0,815 ± 0,020	0,171 ± 0,012	99,014
** HYP 40 - 3	110,769 ± 0,020	0,782 ± 0,001	1,143 ± 0,015	98,074
	11,679 ± 0,001	0,840 ± 0,004	1,183 ± 0,015	97,977
** HYP 55 - 1	10,436 ± 0,002	0,703 ± 0,040	1,169 ± 0,001	98,128
	9,207 ± 0,030	0,864 ± 0,003	1,117 ± 0,022	98,019
** HYP 55 - 2	10,290 ± 0,020	0,866 ± 0,033	1,092 ± 0,014	98,042
	10,321 ± 0,004	0,792 ± 0,025	1,097 ± 0,011	98,111
** HYP 55 - 3	11,022 ± 0,002	0,876 ± 0,001	1,149 ± 0,001	97,975
	9,839 ± 0,010	0,820 ± 0,006	1,221 ± 0,006	97,959
** HYP 70 - 1	9,437 ± 0,010	0,760 ± 0,016	1,047 ± 0,009	98,193
	8,965 ± 0,004	0,738 ± 0,013	1,149 ± 0,017	98,113
** HYP 70 - 2	12,175 ± 0,002	0,806 ± 0,004	1,104 ± 0,016	98,089
	11,703 ± 0,002	0,847 ± 0,012	1,191 ± 0,028	97,962
** HYP 70 - 3	9,792 ± 0,010	0,937 ± 0,009	1,138 ± 0,001	97,925
	13,087 ± 0,010	0,774 ± 0,006	1,083 ± 0,016	98,143

- Media en base seca ± Desviación estándar. *Los valores de % Grasa y % Fibra no están definidos; los resultados están por debajo del límite de detección, lo cual no indica que la harina esté libre de lípidos y fibra. *HY, Harina de Yuca. **HYP, Harina de Yuca Pretratada.

Tabla 3.1: Composición química de Harina de Yuca sin tratamiento y con tratamiento explosión por vapor. Fuente: [Autora](#).

3.3. Concentración de Amilosa en almidón de yuca, harina de yuca sin y con tratamiento

Los resultados de este estudio se muestran en la Tabla 3.2 y Figura 3.1. El porcentaje de amilosa en harina de yuca sin tratamiento (29,37 %), es mayor frente al contenido de amilosa en almidón de maíz (28 %), y papa (23 %) según Martínez (2005), aunque se encuentra dentro del intervalo reportado por Aryee, *et al.* (2005), 10,9 % – 44,3 %.

Muestra	Concentración Amilosa (mg/l)	Media Amilosa (mg/l)	CV (%)
AY	293,700	293,696 $\pm$ 0,016	4,453
*HY	256,130	256,126 $\pm$ 0,011	3,734
** HYP 40 – 1	248,480	269,951 $\pm$ 30,370	11,250
	291,420		
HYP 40 – 2	285,250	292,407 $\pm$ 10,120	3,462
	299,560		
HYP 40 – 3	297,880	300,407 $\pm$ 3,500	1,189
	302,930		
HYP 55 – 1	294,230	292,407 $\pm$ 2,600	0,882
	290,580		
HYP 55 – 2	271,490	280,898 $\pm$ 13,300	4,734
	290,300		
HYP 55 – 3	267,850	276,828 $\pm$ 12,700	4,589
	285,810		
HYP 70 – 1	293,110	287,354 $\pm$ 8,140	2,832
	281,600		
HYP 70 – 2	244,830	267,986 $\pm$ 32,750	12,221
	291,140		
HYP 70 – 3	291,990	299,846 $\pm$ 11,110	3,707
	307,710		

■ Media en base seca $\pm$ Desviación estándar. *HY, Harina de Yuca. **HYP, Harina de Yuca Pretratada-presión-número ciclos.

Tabla 3.2: Concentración de amilosa en almidón de yuca, harina de yuca sin y con tratamiento para las 9 muestras del diseño factorial Completo 3^k (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*; N.Ciclos: 1, 2, 3)

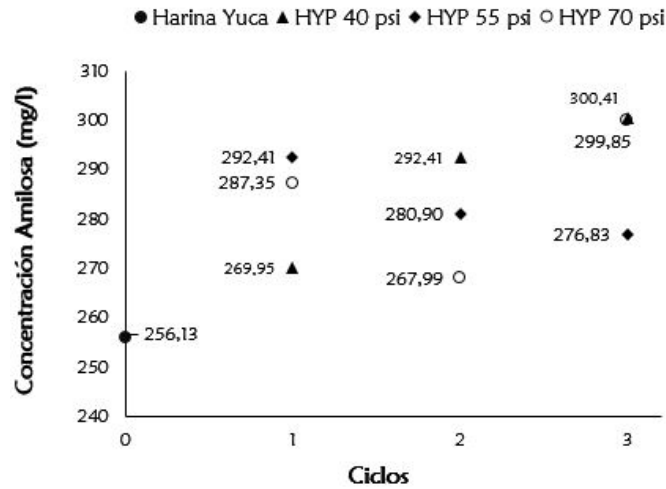


Figura 3.1: Concentración de amilosa (mg/l) para los tres niveles seleccionados del factor Ciclos en el diseño de experimentos 3^k factorial completo en harina de yuca sin tratamiento y pretratada a 40 psi , 55 psi y 70 psi .

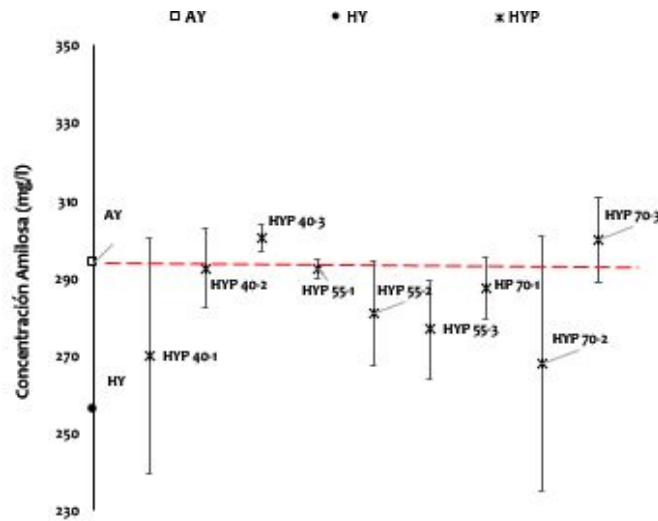


Figura 3.2: Concentración de amilosa (mg/l) para los tres niveles de los factores seleccionados (P : 40 psi , 55 psi , 70 psi ; N.Ciclos: 1, 2, 3) comparados con la concentración de amilosa en almidón de yuca y harina de yuca sin tratamiento.

La curva de calibración estándar se encuentra en el Anexo 1. Al comparar el contenido de amilosa en harina de yuca sin y con tratamiento, se aprecia un cambio significativo como se observa en la Figura 3.1, pero entre los niveles de los factores los resultados no muestran una diferencia significativa ($p > 0,05$) sobre el contenido de amilosa en una harina tratada, como lo muestra la tabla ANOVA (Tabla 3.3). Por lo tanto se infiere que ocurrió una hidrólisis previa

(la cadena polimérica de amilosa se hidrolizó, y las ramificaciones de la cadena de amilopectina se desagregaron), y una consecuencia de esto, fue la formación del complejo amino libre-azúcar reductor.

Factores	Suma de Cuadrados [10 ⁵]	Gl	Media de Cuadrados [10 ⁵]	Razón F	Valor p
P: Presión	5,233	2	2,617	0,09	0,9121
C: Ciclos	48,633	2	24,317	0,87	0,4840
P:C	185,433	4	46,358	1,67	0,3162

Tabla 3.3: Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la concentración de amilosa en harinas pretratadas.

Se evidenció que el pretratamiento explosión por vapor produjo un aumento significativo sobre la concentración de amilosa en harina ($p - valor = 4,439 \cdot 10^{-45}$), puesto que el contenido de amilosa en harina de yuca tratada aumentó con respecto al de harina de yuca sin tratamiento, llegando incluso a alcanzar concentraciones mayores a las del contenido de amilosa en almidón de yuca como se observa en la Figura 3.2. La línea punteada en la Figura 3.2, representa la media de la concentración de amilosa en almidón de yuca, en esta se ubican dos puntos del diseño experimental $HYP\ 40 - 3$ y $HYP\ 70 - 3$ que superan al contenido de amilosa en el almidón; por lo tanto, se infiere que con el pretratamiento explosión por vapor es posible alcanzar concentraciones cercanas e incluso superiores a las del almidón de yuca. Solo en dos muestras $HYP\ 40 - 1$ y $HYP\ 70 - 2$ la concentración de amilosa es cercana a la harina sin tratamiento, debido a que las condiciones del pretratamiento favorecieron la reacción de Maillard, más que en el resto de las muestras.

3.4. Relación Amilosa y Amilopectina (Am/Amp) en harina pretratada

La relación entre amilosa y amilopectina (Am/Amp) en los 9 tratamientos y sus duplicados estuvo alrededor de 0,44 % - 0,56 %, como se muestra en la Tabla 3.4. El efecto de los niveles y sus interacciones no es significativo sobre la relación Am/Amp , como se aprecia en la Figura 3.3 y Tabla 3.5 ($p > 0,05$), pero al compararlas con la harina sin tratamiento (0,42 %), se ve

un aumento significativo ($p - valor = 3,883 \cdot 10^{-6}$) del 13,831 % .

Muestra	Amilosa (%)	Amilopectina (%)	Am/Amp*	CV (%)
HY	29,366	70,634	0,420	
** HYP 40 – 1	28,323	71,677	0,440 $\pm$ 0,063	0,143
	32,623	67,377		
** HYP 40 – 2	32,371	67,629	0,493 $\pm$ 0,021	0,043
	33,701	66,299		
** HYP 40 – 3	34,040	65,960	0,527 $\pm$ 0,016	0,030
	35,009	64,991		
** HYP 55 – 1	33,477	66,523	0,494 $\pm$ 0,013	0,026
	32,653	67,347		
** HYP 55 – 2	30,869	69,131	0,469 $\pm$ 0,032	0,069
	32,996	67,004		
** HYP 55 – 3	30,722	69,277	0,461 $\pm$ 0,025	0,054
	32,361	67,639		
** HYP 70 – 1	32,959	67,041	0,476 $\pm$ 0,022	0,046
	31,527	68,473		
** HYP 70 – 2	28,419	71,581	0,452 $\pm$ 0,078	0,173
	33,658	66,342		
** HYP 70 – 3	33,053	66,947	0,529 $\pm$ 0,050	0,094
	36,073	63,927		

■ Media en base seca $\pm$ Desviación estándar.

Tabla 3.4: Porcentaje amilosa y amilopectina en base seca y su realción para harina de yuca sin y con tratamiento (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*; N.Ciclos: 1, 2, 3)

Factores	Suma de Cuadrados [10 ⁴]	Gl	Media de Cuadrados [10 ⁴]	Razón F	Valor p
P: Presión	7,444	2	3,722	0,27	0,775
C: Ciclos	47,444	2	2,372	1,73	0,288
P:C	96,222	4	24,056	1,75	0,300

Tabla 3.5: Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la relación Am/Amp (BS) en harina de yuca pretratada.

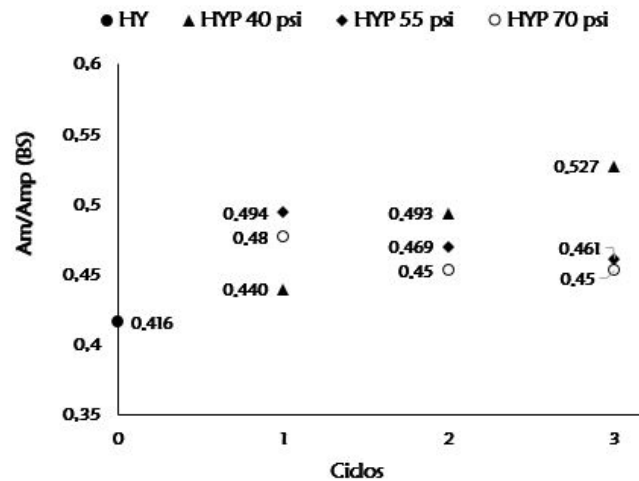


Figura 3.3: Relación en base seca p/p de amilosa y amilopectina para harinas pretratadas y sin tratamiento, para todos los niveles del factor ciclos. (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*).

3.5. Concentración Glucosa

Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 3.6 y Figura 3.4. El vapor de agua condensado mostró una concentración de glucosa por debajo del límite de detección, según el método de caracterización empleado.

En la Tabla 3.7, se muestra que ninguno de los factores y sus interacciones tiene un efecto significativo ($p > 0,05$), sobre la concentración de glucosa de harinas pretratadas. Aunque, con un $p - valor = 2,578 \cdot 10^{-7}$, se confirma que el pretratamiento tuvo un efecto significativo en el aumento del contenido de glucosa en hidrolizados de harina pretratada (166,86 g/l - 243,45 g/l) frente a la no tratada (96,7794 mg/l).

Muestra	Concentración Glucosa (g/l)*	CV (%)	Materia Seca (%)
<i>HY</i>	96,779 ± 0,203	0,210	23,890
<i>HYP 40 – 1</i>	208,526 ± 50,763	24,344	22,400
<i>HYP 40 – 2</i>	207,263 ± 18,608	8,978	22,605
<i>HYP 40 – 3</i>	197,579 ± 6,103	3,089	24,575
<i>HYP 55 – 1</i>	225,684 ± 53,591	23,746	23,835
<i>HYP 55 – 2</i>	192,632 ± 39,003	20,247	22,215
<i>HYP 55 – 3</i>	<i>ND</i>	<i>ND</i>	21,630
<i>HYP 70 – 1</i>	166,857 ± 37,712	22,602	23,645
<i>HYP 70 – 2</i>	204,343 ± 53,228	26,049	22,990
<i>HYP 70 – 3</i>	243,454 ± 1,508	0,620	22,210

- *Media ± Desviación Estándar. *ND*: No Definido. (La muestra no presentó coloración, con el reactivo de kit de glucosa, debido a mayor cantidad de impurezas causando ruido en la medición).

Tabla 3.6: Concentración Glucosa en Hidrolizados Harina de Yuca con y sin Tratamiento para los 9 tratamientos y sus duplicados del diseño factorial completo 3^k . (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*; N.Ciclos: 1, 2, 3).

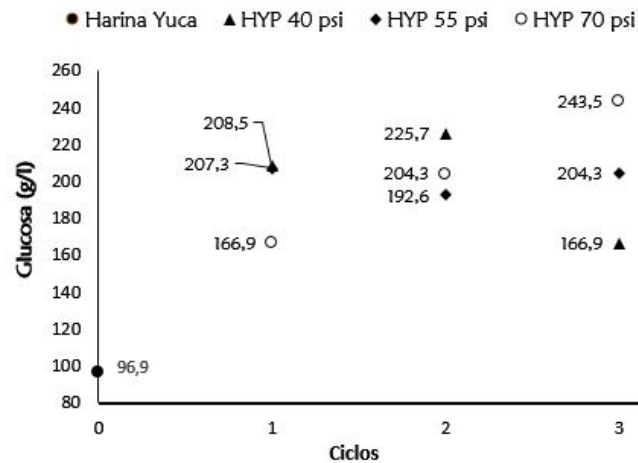


Figura 3.4: Concentración Glucosa (mg/l) en los hidrolizados de harinas tratadas para los tres niveles seleccionados del factor Ciclos (N. Ciclos: 1, 2, 3), en el diseño de experimentos 3^k factorial completo. (Presión: 40 psi , 55 psi , 70 psi).

Factores	Suma de Cuadrados	Gl	Media de Cuadrados	Razón F	Valor p
P	1890,34	2	945,168	0,37	0,7146
C	434,189	2	217,094	0,08	0,9210
P:C	10330,6	4	3730,740	1,44	0,3651

Tabla 3.7: Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la concentración de glucosa en hidrolizados de harinas pretratadas.

3.6. Viscosidad en Hidrolizados de Harina de Yuca Pretratada

Los resultados que se observan en la Tabla 3.8 y Figura 3.5, muestran que la variación en la viscosidad de hidrolizados a partir de *HYP* guardan una tendencia con la variación en el número de ciclos y presión, solo dos muestras (*HYP* 40 – 2) y (*HYP* 70 – 1) tienen una viscosidad ligeramente menor a hidrolizados a partir de harina de yuca, como se aprecia en la Figura 3.5. La tabla ANOVA (Tabla 3.9) muestra que el factor presión, tiene un efecto significativo sobre la viscosidad de hidrolizados ($p > 0,05$). Se observa un aumento representativo para la presión de 55 psi (ver Figura 3.5).

Para entender el comportamiento en la variación de viscosidad para hidrolizados obtenidos de harinas pretratadas, se pretende explicar a partir de la variación en la concentración de glucosa para los hidrolizados obtenidos de harina de yuca pretratada y la viscosidad de estos como se observa en la Figura 3.6; el coeficiente de Pearson 0,47, indica una relación relativamente débil entre estas variables de respuesta, al igual que la correlación ($r = 0,126$) entre viscosidad y Am/Amp . Por lo tanto no hay una explicación de este comportamiento, aunque sigue siendo materia de investigación.

Muestra	Viscosidad (cP)	CV (%)
<i>HY</i>	3,452	---
<i>HYP 40 - 1</i>	$4,027 \pm 0,037$	0,913
<i>HYP 40 - 2</i>	$3,418 \pm 1,513$	44,271
<i>HYP 40 - 3</i>	$4,118 \pm 0,325$	7,891
<i>HYP 55 - 1</i>	$5,6315 \pm 1,384$	24,570
<i>HYP 55 - 2</i>	$6,083 \pm 1,445$	23,740
<i>HYP 55 - 3</i>	$4,948 \pm 1,784$	36,050
<i>HYP 70 - 1</i>	$3,283 \pm 1,223$	37,261
<i>HYP 70 - 2</i>	$4,309 \pm 0,141$	3,800
<i>HYP 70 - 3</i>	$5,405 \pm 0,375$	6,931

--- Este análisis no se hizo por duplicado.

Tabla 3.8: Viscosidad de Hidrolizados de Harina de Yuca y los 9 tratamientos con sus duplicados (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*; N.Ciclos: 1, 2, 3).

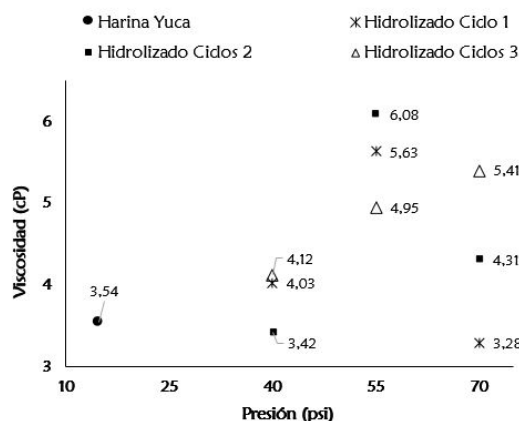


Figura 3.5: Viscosidad (cP) en hidrolizados de harina de yuca sin tratamiento ($P = 14, 7 \text{ psi}$; $N.Ciclo: 0$) y pretratada en función de los niveles de presión seleccionados para el diseño de experimentos 3^k factorial completo. ($N.Ciclos: 1, 2, 3$).

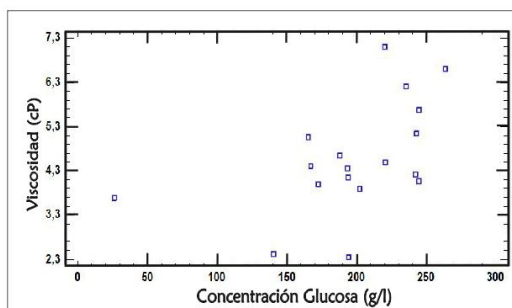


Figura 3.6: Diagrama de dispersión Concentración Glucosa y Viscosidad ($\%cP$) para los tres niveles de los factores seleccionados ($P: 40 \text{ psi}, 55 \text{ psi}, 70 \text{ psi}$; $N.Ciclo: 1, 2, 3$) en el diseño de experimentos 3^k factorial completo.

Factores	Suma de Cuadrados	Gl	Media de Cuadrados	Razón F	Valor p
P	9,225	2	4,613	7,620	0,043
C	0,785	2	0,392	0,650	0,574
P:C	5,505	4	1,401	2,310	0,218

Tabla 3.9: Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para la viscosidad en hidrolizados de harinas pretratadas.

3.7. Materia No Hidrolizada

Los resultados se muestran en la Tabla 3.10 y Figura 3.7. Como lo indica el análisis de varianza (Tabla 3.11), con un nivel de confianza del 95 %, el factor ciclos tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de materia no hidrolizada ($\%MNH$), así el aumento del número de ciclos influye en el aumento del porcentaje de materia no hidrolizada. Se observa en la Figura 3.7 que solo una muestra tiene una disminución en el porcentaje de MNH ($HYP 40 - 1$), con respecto a hidrolizados de harina sin tratamiento. Las mejores condiciones para operar el equipo de explosión y disminuir el porcentaje de impurezas, en los hidrolizados de harina de

yuca tratada, son 40 *psi* y 1 ciclo.

En la Figura 3.8 se observa que la correlación es muy débil entre viscosidad y %*MNH* ($r = 0,281$); concentración de glucosa y %*MNH* ($r = 0,11$), de igual forma al buscar la relación con la concentración de amilosa en harina pretratada resulta, $r = 0,025$. Por lo tanto no hay una relación significativa entre el porcentaje de materia que no hidrolizó y las demás variables de respuesta, consideradas en este estudio. Por lo tanto se ratifica que no se tiene una explicación en el comportamiento de la variación de viscosidad y el contenido de mucílago con respecto a los niveles de los factores seleccionados.

Muestra	Materia no Hidrolizada (%)	CV (%)
<i>HY</i>	15,027	---
<i>HY</i> 40 – 1	15,668 ± 3,250	20,742
<i>HY</i> 40 – 2	16,306 ± 1,812	11,115
<i>HY</i> 40 – 3	17,167 ± 1,510	8,797
<i>HY</i> 55 – 1	13,680 ± 1,764	12,898
<i>HY</i> 55 – 2	16,342 ± 3,653	22,355
<i>HY</i> 55 – 3	23,520 ± 0,625	2,655
<i>HY</i> 70 – 1	16,528 ± 4,154	25,13
<i>HY</i> 70 – 2	15,103 ± 0,387	2,498
<i>HY</i> 70 – 3	19,780 ± 0,152	0,771

--- Este análisis no se hizo por duplicado.

Tabla 3.10: Porcentaje de Materia no Hidrolizada en Hidrolizados de Harina pretratada.

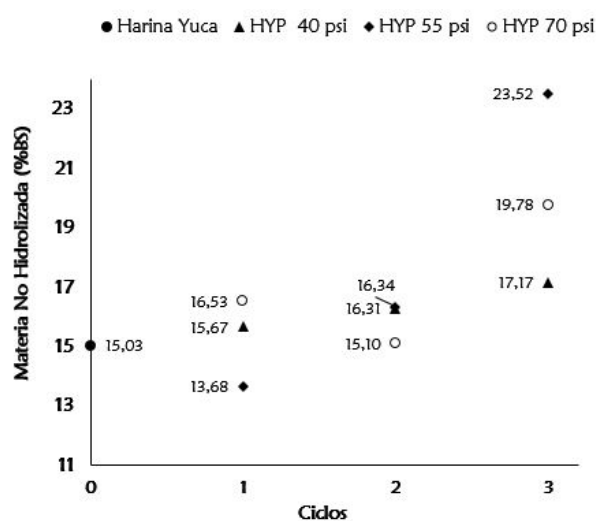


Figura 3.7: Porcentaje de Materia no Hidrolizada en hidrolizados de harina de yuca pretratada para el diseño de experimentos 3^k factorial completo en los tres niveles del factor Número de Ciclos (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*).

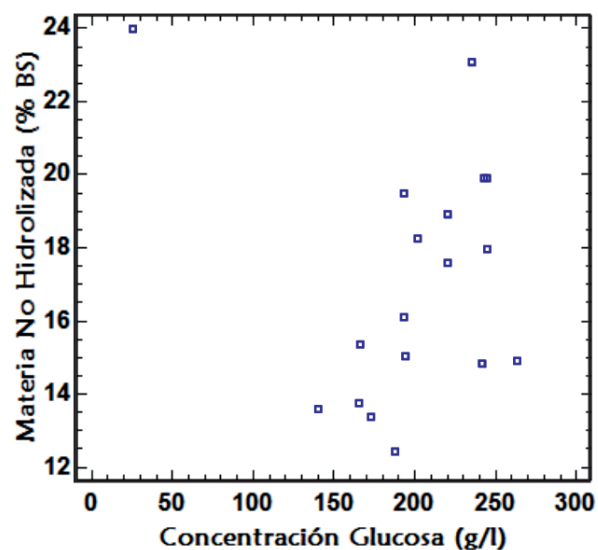


Figura 3.8: Diagrama de Dispersión Concentración de Glucosa y Materia no Hidrolizada (%BS) para los tres niveles de los factores seleccionados (P : 40 *psi*, 55 *psi*, 70 *psi*; N.Ciclos: 1, 2, 3) en el diseño de experimentos 3^k factorial completo.

Factores	Suma de Cuadrados	Gl	Media de Cuadrados	Razón F	Valor p
P: Presión	6,47027	2	3,235	0,580	0,599
C: Ciclos	85,3219	2	42,661	7,680	0,043
P:C	44,6943	4	11,174	2,010	0,257

Tabla 3.11: Análisis de Varianza ANOVA, diseño Factorial 3^k Completo, para el porcentaje de materia no hidrolizada de harinas pretratadas.

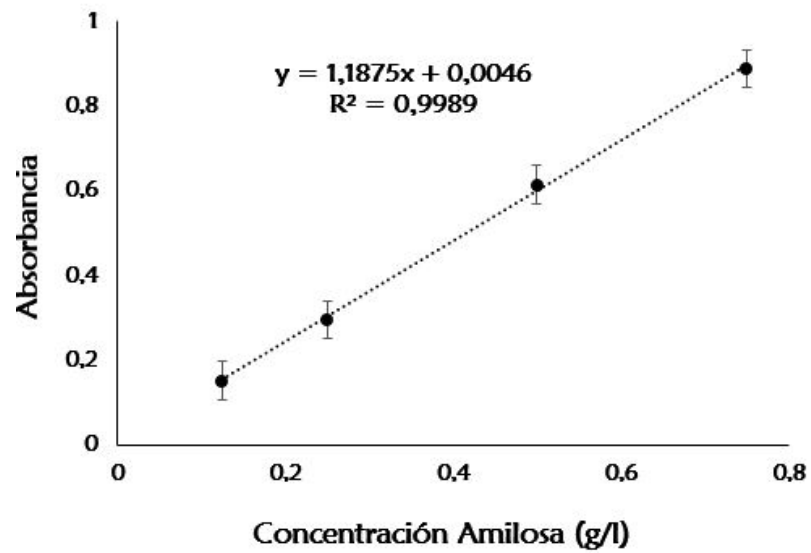
Conclusiones

- Al analizar el efecto del pretratamiento sobre los contenidos de amilosa, amilopectina, y la relación *amilosa/amilopectina*, y la concentración de glucosa se evidencia que existe un aumento de 11,407 %, 4,425 %, 13,831 % y 89,014 %, respectivamente.
- Del análisis estadístico se infiere que no existen diferencias significativas de los factores evaluados sobre la concentración de amilosa, amilopectina, la relación *amilosa/amilopectina* y la concentración de glucosa.
- Finalmente las condiciones del pretratamiento que reducen la viscosidad y el contenido de mucílago en los hidrolizados son 40 *psi* y 1 *ciclo*, es decir, los niveles más bajos seleccionados de la región experimental.

Recomendaciones

- Se recomienda mejorar el diseño del equipo de explosión por vapor con distribuidores de vapor que aumenten el área de contacto, de la harina de yuca con el vapor de agua saturado.
- Se recomienda estudiar los efectos del pretratamiento sobre las características fisicoquímicas de los hidrolizados de glucosa a partir de harina de yuca con alto contenido en fibra y cenizas.

ANEXO 1: Curva de Calibración Amilosa en Harina de Yuca.



Cada punto de la curva se hizo por duplicado.

Figura 3.9: Curva de Calibración Concentración Amilosa en Harina de Yuca.

$$Absorbancia = m[amilosa] + b$$

m	1,1875
b	0,0046

Tabla 3.12: Ecuación de la Curva de Calibración Amilosa. Fuente: [Autora](#).

Bibliografía

- [1] Acevedo Estupiñan M.V., Parra Escudero C.O. Estudio del proceso de clarificación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando membranas cerámicas, (trabajo de grado) Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2013.
- [2] Alvis A., Vélez C.A., Villada H.S., Mendoza M.R. Análisis Físico-Químico y morfológico de almidón de Yuca y Papa y determinación de viscosidad de las pastas. *Información Tecnológica* 2008;19(1); 19-28.
- [3] Anaya Vega F.J. Obtención de jarabes de glucosa a partir de almidón de yuca mediante hidrólisis ácida enzimática asistida por microondas, (trabajo de grado) Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2004.
- [4] Aryee F.N.A, Oduro I., Ellis W.O., Afuakwa J.J. The physicochemical properties of flour samples from the roots of 31 varieties of cassava. *Food Control* 2005; 17(1):916-922.
- [5] Ballesteros I., Oliva J.M., Saez F., Ballesteros M. Ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation of olive oil extraction. *Appl. Biochem Biotechnol* 2001. 91/93:237-252.
- [6] Becerra Riaño J.J. Diseño y Montaje de un piloto de laboratorio para el estudio de la separación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando tecnología membranaria, (trabajo de grado). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2011.
- [7] Betancourth N. La yuca consolida sus raíces. *Boletín electrónico del Consorcio Latinoamericano y del Caribe de apoyo a la Investigación y Desarrollo de la yuca.* 2003. 1: 1-10.

- [8] Carrascal Delgado F.A. Obtención de dextrinas de alta solubilidad y mínima retrogradación a partir de almidón industrial de yuca, (trabajo de grado).Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2005.
- [9] Castaño Pelaez H., Cardona Betancur M. Mejía Gomez C., Acosta Cárdenas A. Producción de etanol a partir de harina de yuca en un sistema de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea. *Dyna* 2011. 169: 158-166.
- [10] Charoenkul N., Uttapap D., Pathipanawac W., Takeda Y. Physicochemical characteristics of starches and flours from cassava varieties having different cooked root textures. *LWT-Food Science and Technology* 2011. 44: 1774-1781.
- [11] García A., Pacheco E. Hidrólisis enzimática *in vitro* y microscopía electrónica de la harina horneada y extruida de arracacha. *Agronomía tropical* 2009; 59(3): 297-308.
- [12] González Pérez J.A., Rodríguez Rico I., Fernández Bellos J.L., Delgado Vidal M. Alternativas de producción de siropes edulcorantes en GydeMa. *Tecnología Química* 2002; 22(1):45-51.
- [13] Hermiati E., Azuma J., Tsubaki S., Mangunwidjaja D.,Sunarti T.C., Suparno O., Prasetya B. Improvement of microwave-assisted hydrolysis of cassava pulp and tapioca flour by addition of activated carbon. *Carbohydr. Polym* 2001; 87(2012):939-942.
- [14] INCP. Indicadores económicos e información financiera INCP. Disponible en: <http://www.incp.org.co/indicadores-economicos-e-informacion-financiera-incp/indice-de-inflacion-1955-2011/>. 08-octubre 2013.
- [15] Industrias del Maíz. S.A. Productos. Disponible en <http://www.industriasdemaiz.com/fabricacion.html>. 05-octubre-2013.
- [16] Mera I., Carrera Cataño J., Obtención de glucosa a partir de almidón de yuca *Manihot esculenta*. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2005; 3(1): 54-63.
- [17] Mera I., Hoyos J.L., Carrera J., Forero L.C., Velasco R. Caracterización enzimática de alfa-amilasa y glucosamilasa en la hidrólisis enzimática de almidón de yuca (*Manihot esculenta*). Facultad de Ciencias Agropecuarias 2003; 1: 83-88.

- [18] Morales Suárez Y., Sánchez Pacheco I.A. Diseño conceptual y comparación técnica de los procesos de hidrólisis ácida y enzimática para la producción de glucosa a partir de almidón de yuca, (trabajo de grado). Bucaramanga, Colombia:Universidad Industrial de Santander; 2004.
- [19] Oliva Domínguez J.M. Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de Chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*. (Tesis doctoral). Madrid,España: Universidad Complutense de Madrid; 2003.
- [20] Pérez E., Gilbert O., Rolland-Sabaté A., Jiménez Y., Sánchez T., Giraldo A., Pontoire B., Guilois S., Lahon M.C., Reynes M., Dufour D. Physicochemical, functional, and macromolecular properties of waxy yam starches discovered from "Mapuey" (*Dioscorea trifida*) genotypes in the Venezuelan Amazon. *J Agric Food Chem* 2011, 59(1): 263-273.
- [21] Rolland-Sabaté A., Sánchez T., Buleón A., Colonna P., Jaillais B., Ceballos H., Dofour D. Structural characterization of novel cassava starches with low and high-amylose contents in comparison with other comercial sources. *Food Hydrocolloids* 2012, 27:161-174.
- [22] Rufián Henares José A., Delgado Andrade C., Morales J.F. Assessing the Maillard reaction development during the toasting process of common flours employed by the cereal products industry. *Food Chemistry* 2009; 114: 93-99.
- [23] Ruiz Camacho M.Ir. Obtención de jarabes de glucosa a partir de almidón de yuca por medio de hidrólisis enzimática, para se usados como sustrato en la producción de bioetanol, (trabajo de grado). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2009.
- [24] Shariffa Y.N., Karim A.A., Fazilah A., Zaidul I.S.M. Enzymatic hydrolysis of granular native and mildly heat-treated tapioca and sweet potatoe starches at sub-gelatinization temperatura. *Food Hydrocolloids* 2009; 23: 434-440.
- [25] Sung Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for etanol production: a review. *Bioresource Tecnology* 2002; 83: 1-11.
- [26] Vidal Tobar CR. El ñame espino (*Dioscorea rotundata* Por.): una opción en la producción de jarabes edulcorantes intermedios para la industria alimentaria. *RIAA* 2010; 1(2): 10-28.
- [27] Yu Z., Zhang B., Yu F., Xu G., Song A. A real explosion: The requirement of steam explosion pretreatment. *Bioresource Technology* 2012; 121:335-341

- [28] Zavareze da R. E., Storck R.C., Suita da Castro L.A., Artigas Shirmer M., Guerra Dias A.R.
Effect of heat-moisture treatment on rice starch of varying amylose content. FoodChemistry
2010; 121 358-365.